

Nagy szögfelbontású rádió-interferometria – űreszközökkel

Frey Sándor és Gabányi Krisztina Éva

Földmérési és Távérzékelési Intézet, Kozmikus Geodéziai Observatórium, Penc
MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, Budapest

Kivonat

A világűrben érkező rádiósugárzás legnagyobb része – csakúgy, mint a látható fény – akadálytalanul áthatol a Föld légkörén. Így rádiócsillagászati megfigyeléseket földi rádióteleszkópokkal is kitűnően lehet végezni. Miért célszerű akkor mégis a Föld körül keringő űreszközökre telepíteni rádiótávcsövet? Ennek megértéséhez felidézzük, hogy a rádiócsillagászatban használatos műszerek szögfelbontása – a látható fényéhez viszonyítva sok nagyságrenddel hosszabb elektromágneses hullámhosszak miatt – igencsak korlátozott. Hatalmas rádióteleszkópok építése lehetetlen vállalkozás volna, ezért fejlődött ki az interferometrikus megfigyelési módszer. Az egymástól távol elhelyezett antennák adatainak kombinálásával egy akkora képzeletbeli rádióteleszkópot lehet létrehozni, amelynek a szögfelbontását nem az egyedi antennák átmérője, hanem a köztük levő távolság határozza meg. Az 1960-as évek végén kifejlesztett nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (VLBI) alkalmas arra, hogy a Föld különböző pontjain elhelyezett rádióteleszkópokból alkosson egyetlen hálózatot. Így centiméteres hullámhosszakon az ívmásodperc ezred részének megfelelő, rendkívül finom szögfelbontással lehet vizsgálni a kompakt rádiósugárzó égitestek szerkezetét. Vannak azonban olyan csillagászati objektumok, amelyek még így is felbontatlanok maradnak! Ezeknek a megfigyelésére szolgál az *űr-VLBI* technika. A földi rádiótávcső-hálózatot egy műholdon elhelyezett antennával kiegészítve, akár bolygónk átmérőjénél is jóval hosszabb bázisvonalak s így még finomabb felbontás érhető el. Bemutatjuk az *űr-VLBI* technika alapelvét, és szólunk az első *űr-VLBI* mesterséges holdról, a Japánból 1997-ben felbocsátott *HALCA*-ról. Összefoglaljuk az új űrszövegészeti megfigyelési technikával az elmúlt években elért tudományos eredményeket, kiemelve közülük egyes hazai vonatkozásúakat is. Végül szót ejtünk az *űr-VLBI* jövőjéről, a technika előtt álló műszaki és tudományos kihívásokról, a közeli években felbocsátandó új *űr-VLBI* műholdak – az orosz *RadioAstron* és a második generációs japán *ASTRO-G* – programjáról is.

Bevezető

A nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*) rádiócsillagászati mérési eljárást először 1967-ben alkalmazták. A módszer alkalmas a rádiótartományban sugárzó kompakt, nagy energiájú objektumok (pl. kvazárok, rádiógalaxisok magjai, mézerek, egyes csillagok) nagy szögfelbontású leképezésére. A VLBI kifejlesztéséhez a „hajtóerőt” az adta, hogy a rádiócsillagászatban a megépíthető antennákkal elérhető felbontás viszonylag szerény az optikai hullámhossztartományhoz képest. A diffrakciós határ, az elérhető szögfelbontás a hullámhosszal egyenesen, a műszer nyílásának átmérőjével fordítottan arányos. Mivel a rádióhullámhosszak sok nagyságrenddel meghaladják a látható fény hullámhosszát, a hagyományos optikai távcsövek felbontóképességének eléréséhez ugyanennyivel nagyobb eszközöket kellene építeni. Ez azonban műszakilag megoldhatatlan feladat volna.

A VLBI alapelve, hogy egy időben, egymástól távol levő rádióteleszkópokkal ugyanazt a rádióforrást figyelik meg, az adatokat mágnesszalagon, újabban mágneslemezen rögzítik, megfelelően pontos atomi oszcillátorok által szolgáltatott órajelekkel együtt. Az interferenciát később, az állomásoktól összegyűjtött szalagok (diszkek) visszajátszásával és a jelek korrelálásával állítják elő. Így utólag valójában egy akkora méretű rádiótávcsövet „hoznak létre”, amekkora a két antenna közötti távolság, a bázisvonal hossza. Az utóbbi években, a széles sávú adatátviteli hálózatok kapacitásának ugrásszerű bővülésével megnyílt a lehetőség a távoli antennák és a korrelátor

közvetlen összekapcsolására, a valós idejű ún. e-VLBI technika alkalmazására (pl. Szomoru 2008). Az interferométer méretének gyakorlatilag csak a Föld kiterjedése szab határt, s az így elérhető szögfelbontás (néhány cm-es hullámhosszakon akár az ívmásodperc ezred része) jelenleg felülmúlja bármely más csillagászati megfigyeléssel megvalósítható felbontást.

Hamar felismerték a VLBI technika fontosságát a geodéziai és geodinamikai alkalmazásokkal kapcsolatban is. Ez azon a tényen alapul, hogy a tőlünk nagyon távol elhelyezkedő, tehát látszó sajátmozgást elvileg nem mutató, nagyon kompakt extragalaktikus rádióforrások (pl. kvazárok) ideális vonatkoztatási rendszert jelölnek ki. Ebben a kvázi-inerciális rendszerben a Föld mozgása – a felszínén elhelyezkedő VLBI antennák segítségével – nagy pontossággal leírható. A legfőbb, VLBI technikával mérhető geofizikai jelenségek között említhetjük a pólusmozgást, a Föld forgási szögsebességének változását ($UT1-UTC$), a nutációt és precessziót, az árapályjelenségeket. A VLBI volt az első eljárás, amellyel a jelenkori tektonikus táblamozgások mértéke először nagy pontossággal mérhetővé vált. Napjainkban a geodéziai VLBI méréseket az egész Földet átfogó hálózat segítségével, szolgálatyszerűen végzik (l. még Frey 2007).

Miért lehet célszerű egy rádiótávcsövet a Föld körüli pályára állítani? Az űrszillagászati eszközök esetében megszoktuk, hogy segítségükkel általában a légkör elnyelő vagy zavaró hatását szeretnék kiküszöbölni. A földi légkör ugyanis számos elektromágneses hullámhossztartományban (pl. a gamma- és röntgéntartományban, valamint az ultrabolya és az infravörös tartomány jelentős részében) átlátszatlan. A látható fényben is lehet szó arról, hogy a nappalok és éjszakák földi változásából következő kényszerű mérési szüneteket szeretnék áthidalni egy hosszú idejű, folyamatos észlelést biztosító műholddal. Ugyanakkor tudjuk, hogy a rádióhullámok széles tartományában a légkör átlátszó, a világűrből érkező sugárzást tehát földfelszíni teleszkópokkal is lehet észlelni. Ráadásul földi rádiócsillagászati megfigyeléseket nappal is végezhetünk. Azt is hozzátehetjük, hogy egy mesterséges hold fedélzetén elhelyezhető, legfeljebb kb. 10 m átmérőjű rádióantenna gyűjtőfelülete lényegesen kisebb egy hagyományos földi rádióteleszkópénál. Így nyilvánvaló, hogy önmagában, egyedül nem sok hasznát vehetnénk egy űr-rádióteleszkópnak. Ha azonban a földi interferométeres hálózatba kapcsoljuk, akkor tovább, immár bolygónk átmérőjénél is nagyobbra növelhető a legnagyobb bázisvonalak hossza, tovább javítva az elérhető szögfelbontást. Ez a technika az űr-VLBI, a hagyományos földi VLBI kiterjesztése.

Az első űr-VLBI mesterséges hold, a HALCA

1997. február 12-én a japán ISAS (*Institute of Space and Astronautical Science*; ma az egységes JAXA űrügynökség része) állította pályára a HALCA (*Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy*) műholdat. Az űrbeli rádiótávcső „hozzáadásával” elérhető szögfelbontás kb. háromszor jobb lett a csak a Földön, ugyanazon frekvencián elérhető felbontásnál (Hirabayashi et al. 1998). A HALCA (az építése során használt korábbi nevén MUSES-B) 6,3 órás keringési idejű pályán mozogva, két frekvencián (1,6 GHz és 5 GHz) észlelt együtt a földi VLBI hálózatokkal. A harmadik, 22 GHz-es vevőberendezése sajnos meghibásodott, ezért az tudományos értékű adatokat nem szolgáltatott. A HALCA mérési adatait 128 Mbit/s sebességgel a kijelölt földi követőállomásokra sugározta, ahol mágnesszalagokra rögzítették azokat. Mivel a hatalmas adatmennyiség tárolására a fedélzetén nem volt mód, a mérések csak akkor voltak használhatók, ha a műhold épp a földi követőállomások egyikének látóterében tartózkodott. A program mögött egy szinte hihetetlenül nagy, világméretű összefogás állt: Európa, Amerika, Japán, Ausztrália, Kína 40-nél több rádióteleszkópja, 4 országban 5 követőállomás, 3 VLBI korrelátor dolgozott benne. A HALCA műholdra irányítói az utolsó parancsot 2005 novemberében küldték fel.

A Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) penci Kozmikus Geodéziai Observatóriumában (KGO), Fejes István vezetésével egy kis csoport bekapcsolódott az űr-VLBI program előkészítésébe, majd a kutatásokba is, mind a csillagászati, mind a lehetséges geodéziai alkalmazások területén. Ennek eredményeképpen a 90-es években egy sor elméleti tanulmány (l. pl. Fejes 1996) és egy számítógépes szimulációs program (Frey et al. 1998) is született. Ez utóbbit világszerte használták más kutatók is, amikor űr-VLBI méréseiket tervezték. Lehetővé vált, hogy aktívan részt vegyünk a

világ egyik legkorszerűbb és legdrágább űrcsillagászati kísérletében – anélkül, hogy akár a műhold megépítéséhez, akár a földi rádiótávcső-hálózat üzemeltetéséhez hozzájárultunk volna.

A program csillagászati célpontjai leginkább a távoli, rádiótartományban erős sugárzást kibocsátó, rendkívül kompakt aktív galaxismagok, kvazárok voltak. Ezeknek a kutatása a modern asztrofizika egyik kiemelt témája. Az aktív galaxismagok közepén hatalmas (akár több milliárdnyi naptömeggel egyenértékű) fekete lyukak találhatók. A közvetlen közelükben levő anyag az erős tömegvonzás hatására forgó akkréciós korongba gyűlik, ahonnan spirális pályán fokozatosan a központi fekete lyukba hullik. A tömeg egy része az erős mágneses tér hatására a forgástengelyek mentén relativisztikus sebességgel kilökődik: ezek az összetartó nyalábok az ún. jetek. A rádiókvazároknál szinkrotronsugárzást figyelhetünk meg. A VLBI technika segítségével hatolhatunk a legközelebb a jetek kiindulási helyéhez, bár még az űr-VLBI kivételesen jó szögfelbontása is kevés ahhoz, hogy a központi fekete lyuk közvetlen környezetét tanulmányozhassuk. A legkedvezőbb helyzetben természetesen a hozzánk legközelebbi aktív galaxismagok esetében vagyunk, ahol a finom szögfelbontás egyúttal kitűnő lineáris felbontással párosul. (Nem véletlen, hogy ezek az objektumok a legfontosabb űr-VLBI célpontok közé tartoznak.)

Rádiójetek galaktikus forrásokban is megfigyelhetők. Ezek az ún. mikrokvizárok kettős csillagrendszerben találhatók. A rendszerben levő kompakt objektum (neutroncsillag vagy néhányszor 10 naptömegnyi fekete lyuk) akkréció révén a kísérőjétől szerez anyagot, ami a kvazárokéhoz hasonló (csak kb. hat nagyságrenddel kisebb) aktivitáshoz vezet. Kompakt VLBI célpontként szóba jöhetnek még a mézerek. A csillagközi gázban, általában a keletkező vagy éppen az életük vége felé járó csillagok környezetében a mézerek természetes módon alakulnak ki, amikor egyes molekulák pl. ütközések révén gerjesztődnek, s az elektronok magasabb energiaszinteket foglalnak el. A túlpopulált elektronszintekről alacsonyabb szintekre jutó elektronok jól meghatározott frekvenciájú, igen keskeny sávú mikrohullámú (rádió-) sugárzást bocsátanak ki, ami kis térrészből (foltokból) származik. Erős mézerjelenséget produkáló molekulák például a víz, a hidroxil gyök, a szilícium-oxid, a metanol. A színképvonalak Doppler-eltolódásának és kiszélesedésének révén a mézerek a gázra jellemző mozgások felmérésére is használhatók. Extragalaxisokban előfordul a megamézer-jelenség. A centrum körül keringő megamézerek mozgásának megfigyelésével pl. egyes galaxisok központjában az ott levő fekete lyuk tömege közvetlenül is megmérhető.

A japán vezetésű VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*) keretében, a HALCA műholdnak a globális interferométeres hálózatba kapcsolásával elért eredmények közül – a teljesség igénye nélkül – megemlítünk itt néhányat. További fontos eredmények és szakirodalmi hivatkozások például Kameno (2009) és Frey (2004) cikkeiben találhatók. A programban összesen több mint 700 aktív galaxismagot (*active galactic nucleus*, AGN) figyeltek meg, elsősorban nyílt pályázatokon elbírált javaslatok alapján. Ezen felül a VSOP idejének jelentős részét az 5 GHz frekvencián végzett égboltfelmérés tette ki (l. később). A hozzánk legközelebbi AGN-ek (3C 84, M 87) jetjeinek komponenseinél parszekesnél is kisebb lineáris skálán gyorsuló mozgást ismertek fel. A legközelebbi kvazár, a 3C 273 esetében sikerült felbontani a jet keresztirányú szerkezetét, amiből a kifelé áramló plazma viselkedését meghatározó fizikai folyamatokra lehet következtetni. A 1928+738 jelű kvazár négy év alatt végzett többszöri megfigyelése alapján precesszióból származó ballisztikus mozgással lehetett modellezni a jetben észlelhető gyors változásokat. A már említett égboltfelmérés (*VSOP Survey Program*; Hirabayashi et al. 2000) célja a legfényesebb aktív galaxismagok ezred ívmásodpercesnél (mas) is finomabb felbontással történő vizsgálata, a minta megfigyelt tulajdonságainak statisztikai elemzése volt. A legfontosabb eredmény szerint a források mintegy felének fényességi hőmérséklete meghaladta a 10^{12} K értéket, ami egyértelműen a jetek sugárzását felerősítő relativisztikus nyalábolásra utal. Az is kiderült, hogy az AGN-ek magjában jellemzően megtalálható egy igen kompakt, legfeljebb 0,2 mas méretű rádiósugárzó komponens.

Magyar részről számos kutatásba kapcsolódtunk be, illetve önálló megfigyelési javaslatokat is tettünk. A VSOP égboltfelmérés előkészítése során, még a HALCA indulása előtt több száz kiválasztott aktív galaxismagot vizsgáltunk földi megfigyelésekkel (Fomalont et al. 2000). Utána részt vállaltunk az űr-VLBI adatok feldolgozásában és értelmezésében is. Kutattuk a legtávolabbi (a legnagyobb z vöröseltolódású) rádiókvazárok nagyfelbontású szerkezetét (l. Frey et al. 2009, és az ottani

hivatkozások). A 2215+020 jelű kvazár ($z=3,57$) esetén a földi és űr-VLBI képek összehasonlításával következtettünk a jet keresztirányú méretére, amiből megbecsülhető volt a központi fekete lyuk tömege (kb. négy milliárd naptömeg; Lobanov et al. 2001). A 1351-018 kvazár ($z=3,71$) esetében két időpontban végzett méréseink alapján 0,5 mas skálán sikerült kimutatnunk a jet komponensének látszólag „szuperfénysebességű” mozgását (Frey et al. 2002a). Meghatároztuk a közvetlen VLBI képalkotással kapott eddigi legnagyobb alsó korlátot a fényességi hőmérsékletre (6×10^{13} K) egy aktív galaxismag, a 0235+164 jelű, erősen változó BL Lac objektum esetében (Frey et al. 2000, 2006).

Az 1980-as és 90-es években hazai vezetéssel készített megvalósíthatósági tanulmányok (l. Fejes et al. 1996 és az ottani hivatkozások) szerint az űr-VLBI technika elvben alkalmas geodéziai jellegű tudományos feladatokra is: a geocentrikus földi vonatkoztatási rendszer és az égi vonatkoztatási rendszer közvetlen összekapcsolására; a földi VLBI antennák geocentrikus helyvektorának meghatározására anélkül, hogy más műholdas geodéziai technikákkal való együttes mérésre (a földi állomások kollokációjára) szükség volna; az űr-VLBI műholdak pályameghatározási pontosságának javítására, a bázisvonalakon mért időkésés és időkésés-változás adatoknak mint új típusú követési adatoknak a pályameghatározó eljárásba való bevonásával. A viszonylag pontatlan pályameghatározás és más gyakorlati problémák miatt azonban az első űr-VLBI mesterséges hold, a japán HALCA csak arra volt alkalmas, hogy a referencia-rendszerek összekapcsolásának, ill. a pályameghatározás javításának koncepcióját demonstrálja (Frey et al. 2002b).

Készülő új űr-VLBI programok

RadioAstron

Az orosz RadioAstron űr-VLBI mesterséges hold előkészületei még a szovjet időkben, az 1980-as években indultak (pl. Andreyanov et al. 1986). A fejlesztést a technikai problémákon túl hosszú ideig elsősorban pénzügyi korlátok akadályozták. A program az ezredforduló tájékán éledt újjá, s bár számos elemében megújult, a RadioAstron a lényegét tekintve inkább első, mint második generációs űr-VLBI műholdnak tekintendő. Felbocsátását jelenleg 2010 elejére tervezik. A négy frekvenciatartomány: 0,327 GHz, 1,7 GHz, 4,8 GHz és 18–25 GHz. A RadioAstron igen elnyúlt pályán fog keringeni, földtávolban megközelíti a Hold pályájának megfelelő távolságot. A pályaelemeket főleg a Holdtól származó gravitációs perturbációk a műhold működési élettartama alatt jelentősen megváltoztatják, így elérhető, hogy a pályasík térbeli elhelyezkedése széles tartományt felöleljen. A hozzávetőleges pályaparaméterek a következők: keringési idő 9,5 nap (7 és 10 nap között változó); fél nagytengely 183 000 km; inklináció $51,6^\circ$. A perigeum távolsága 10 ezer és 70 ezer km közt, az apogeumé 310 ezer és 390 ezer km közt változik majd (Kardashev 2008). A RadioAstron egy 10 m átmérőjű, 4,3 m fókusz távolságú, 27 szénszálas kompozit szegmensből álló, kinyitható paraboloid antennát visz magával.

A RadioAstron és a földi antennák között elérhető igen hosszú (kb. 350 ezer km-es) bázisvonalakon egyrészt viszonylag kevés égi rádióforrás detektálása remélhető – mivel azoknak nagyon kompaktnak kell lenniük –, másrészt a jó minőségű interferométeres képalkotás az így kialakított űr-VLBI hálózattal a gyakorlatban igen nehéz. A magas pálya egyéb gyakorlati problémákat (pl. pontatlan pályarekonstrukció) is felvet. A nemzetközi (európai, amerikai, ausztrál) földi VLBI hálózatokkal jelenleg nincsenek érvényes keretmegállapodások a közös mérési programok végrehajtására. Ezért a RadioAstron – a kezdetekben mindenképpen – főleg orosz területen levő földi VLBI antennákra támaszkodik majd. Ugyanez igaz a műholdkövető állomásokra. Az interferencia előállítását is saját korrelátorral oldják meg. A RadioAstron fedélzetén nagy stabilitású hidrogénméter frekvenciaetalont (atomórát) helyeznek el.

A műhold felbocsátása után legalább 3 hónapig tesztelnék a pályán a berendezéseket. Ezt követően kb. 4 hónapig olyan méréseket végeznének, amelyek a legfontosabbak a projekt számára. A műhold használata ezután nyílt lesz, az első időszakot követően 50-50%-os arányban végeznének egyedi javaslatokon alapuló megfigyeléseket, illetve ún. tudományos kulcsprogramokhoz (*Key Science Programs*) kapcsolódó megfigyeléseket. Valójában ez utóbbi kategória is nyitott lesz a nemzetközi együttműködésre.

ASTRO-G

A japán ISAS/JAXA jelenleg a következő űr-VLBI mesterséges hold építésén dolgozik. Az ASTRO-G jelzésű műholdat (Tsuboi 2009) a VSOP-2 program keretében, mintegy a VSOP/HALCA folytatásaként tervezik felbocsátani, valószínűleg 2013 első felében. A második generációs űr-VLBI műhold számára kitűzött cél egyrészt a szögfelbontás, másrészt az érzékenység jelentős (nagyságrendnyi) javítása. Az első cél érdekében a HALCA-val összehasonlítva megnövelik az észlelési frekvenciákat (8, 22 és 43 GHz). Az ASTRO-G műhold pályamagassága, amely végső soron meghatározza a maximálisan elérhető földi-űr bázisvonalak hosszát, számottevően nem változik: a magasság perigeumban 1000 km, apogeumban 25 000 km. Az ezekhez tartozó keringési idő 7,5 óra. A pálya tervezett inklinációja 31° . A földi követőállomások listája még nem végleges: Usuda (Japán), Yebes (Spanyolország), Canberra (Ausztrália), Green Bank (USA). Egyéb lehetséges antennák: Tidbinbilla (Ausztrália), Hartebeesthoek (Dél-Afrika), Santiago (Chile).

Az érzékenység növelése érdekében a Föld körüli pályára állítandó antenna átmérője megnő. Ezt a gyakorlatban hét darab, hatszög alakú elemből összeállított, 9,2 m átmérőjű, 7 m fókusz távolságú paraboloid felülettel oldják meg. Az 1,9 m fókusz távolságú hiperbolikus segédtükrő 5 m-rel az antenna fölött helyezkedik el a Cassegrain-fókuszban. Az adattovábbítási sebességet a HALCA-éhoz képest megnyolcszorozzák, 1 Gbit/s-ra növelik. A különböző frekvencián működő vevőberendezések elhelyezkedése lehetővé teszi, hogy kb. 10 másodperc alatt megváltoztassák az észlelési frekvenciát. Az X sávú (8,0–8,8 GHz) vevő nem, de a K (20,6–22,6 GHz) és Q (41,0–45,0 GHz) sávú rádiószillagászati vevők hűtött egységben lesznek elhelyezve. A magasabb frekvenciás vevőberendezések pontosabb antennafelületet követelnek – ez a műhold elkészítésével kapcsolatos egyik fő technológiai kihívás. Az érzékenység növelését szolgálja a földi VLBI technikában meghonosodott fázisviszonyításos (*phase-referencing*) módszerrel történő megfigyelések lehetővé tétele. Ehhez két alapvető, korábban a HALCA-nál még nem megoldott dolog szükséges.

Az egyik feltétel az egymáshoz közeli égi rádióforrások (a referenciaforrás, ill. a tudományos célpont) közti gyors váltogatás lehetősége. Erre azért van szükség, mert a földi antennáknak a légköri koherenciaidőn belül meg kell tudniuk oldani egy referencia-célpont ciklust. Hogy ez a magasabb frekvenciákon is kivitelezhető legyen, ahhoz az ASTRO-G például 1° -on belüli szögtávolságot kb. 2 perc alatt tud áthidalni.

A fázisviszonyításos mérések másik alapfeltétele a műhold pillanatnyi helyzetének (pályájának) precíz meghatározása. Az erre vonatkozó követelmények meglehetősen szigorúak: az általános cél 10 cm-es pályarekonstrukciós pontosság elérése. A pontosságnak (1σ) perigeumban lehetőség szerint néhány cm-nek, apogeumban 30–100 cm-nek kell lennie. Ennek eléréséhez a hagyományos doppleres méréseken alapuló pályameghatározás nem elégséges. A fedélzetre tervezett műholdas navigációs vevőberendezéssel a 20 000 km magasan keringő GPS navigációs műholdak jeleit lesznek képesek használni. Mivel az ASTRO-G pályájának magassága időnként nagyobb, tervezik az addigra várhatóan kiépülő európai Galileo rendszer (23 000 km) műholdjainak használatát is. A modellszámítások szerint a Galileo belépésével a GPS alapú pályameghatározás pontossága megkétszerezhető. Az ASTRO-G-n lézertükröt is elhelyeznek, ami – ha nem is állandóan, de alkalmanként – lehetőséget ad műholdas lézertáv mérési eljárás alkalmazására is a pályameghatározásban.

Mint a fentiekből látható, a megkívánt érzékenység eléréséhez szükséges, a halványabb rádióforrások megfigyelését is lehetővé tevő fázisviszonyításos méréseknek számos, műszakilag nehezen megoldható feltétele van. Ezekhez adódik még, hogy a szóba jöhető kompakt, fényes kalibrátorok nem nagy sűrűségben találhatók meg az égen. Különösen igaz ez a legnagyobb megfigyelési frekvenciák esetén (Asaki et al. 2007). Ha bármilyen okból nem volna lehetséges a gyors referencia-célpont ciklus megvalósítása, egyes – igaz, korlátozott – esetekben alternatív megoldást jelenthet az ún. antennanyalábon belüli fázisviszonyítás (*in-beam phase-referencing*) alkalmazása (Frey et al. 2009). Ez akkor alkalmazható, ha két rádióforrás – a halvány célpont és a referenciaforrás – olyan kis szögtávolságban látható, hogy mindketten beleesnek a viszonylag kis átmérőjű (alig 10 m-es) antenna elsődleges nyalábjába. Ez 8,4 GHz frekvencián $12'$. Ebben az esetben elegendő a földi VLBI antennáknál alkalmazni a gyors irányváltoztatást, a Föld körüli pályán keringő antenna ezalatt

végig azonos irányba állítva dolgozhat. Vizsgálataink szerint legalább húsz halvány rádiókvázarra teljesül az, hogy megfelelően közeli irányban látszik valamelyik alkalmas referenciaforráshoz, így sikeresen tanulmányozható lesz az ASTRO-G-t is magában foglaló űr-VLBI hálózat segítségével.

A potenciális kalibrátorok számának növeléséhez az ASTRO-G felbocsátásáig bővíteni kell a Földről megfigyelt AGN-ek számát, hogy közöttük minél több fényes és kompakt rádióforrást találjunk. Ennek egy módja, hogy ismert katalógusokból előzetesen ígéretesnek tűnő jelölteket válogatunk ki, amelyek azután hatékonyan ellenőrizhetők a korlátozott földi VLBI erőforrások használatával (l. Geréb K. cikkét e tanulmány után).

Összefoglalás

Az űr-VLBI technika a lehető legszélesebb nemzetközi összefogással válhat csak sikeressé. Ebből szinte természetesen adódik, hogy a más űrszillagászati programoknál megszokottnál lényegesen nyitottabb. Így magyar részről továbbra is kitűnő alkalom kínálkozik a tudományos programba való bekapcsolódásra. Erre alkalmassá tesznek bennünket a FÖMI KGO-ban korábban elért eredmények és a megszerzett tapasztalatok. A majdani sikeres pályázatok reményében az űrprogramok jelenlegi előkészítési fázisában feladatunk a naprakész tájékozódás, valamint a földi előkészítő mérésekben és a mérési módszerek kidolgozásában való aktív részvétel.

Köszönetnyilvánítás

A második generációs űr-VLBI programokba való bekapcsolódásunk előkészületeit a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI, TP-314), a tudományos vizsgálatokat részben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA, K72515) támogatják.

Irodalom:

- Andreyanov, V. V. et al. 1986, Project Radioastron: an Earth–Space Interferometer, *Soviet Astron.*, 30, 504
- Asaki, Y. et al. 2007, Verification of the Effectiveness of VSOP-2 Phase Referencing with a Newly Developed Simulation Tool, *ARIS, Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 397
- Fejes, I., Kawaguchi, N., Mihály, Sz. 1996, Space VLBI: background of an experiment proposal, *Astrophysics and Space Science*, 239, 275
- Fomalont, E. B. et al. 2000, The VSOP 5 GHz Continuum Survey: The Prelaunch VLBA Observations, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 131, 95
- Frey, S. 2004, Space VLBI, in: *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy*, eds. Mantovani, F., Kus, A. (Kluwer, Dordrecht), 349
- Frey, S. 2007, Alapponatok az égen, *Geodézia és Kartográfia*, 59. évf. 8-9. sz., 29
- Frey, S., Fejes, I., Heitler, G., Noszticzius, I., Paragi, Zs. 1998, Space VLBI Assistance Software - A New Version, in: *Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, *Proc. IAU Coll.* 164, eds. Zensus, J. A., Wrobel, J.M., Taylor, G. B. (ASP, San Francisco), 399
- Frey, S. et al. 2000, Dual-frequency VSOP observations of AO 0235+164, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 975
- Frey, S. et al. 2002a, Space VLBI observations of the quasar 1351-018: tentative detection of apparent superluminal motion at $z=3.707$, in: *Proc. 6th European VLBI Network Symposium*, eds. Ros, E., Porcas, R. W., Lobanov, A. P., Zensus, J. A. (MPIfR, Bonn), 89
- Frey, S. et al. 2002b, Geodetic space VLBI: the first test observations, *Adv. Space Res.*, 30, 357
- Frey, S. et al. 2006, VSOP monitoring of the compact BL Lac object AO 0235+164, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 58, 217
- Frey, S., Gabányi, K. É., Asaki, Y. 2009, Identification of Potential Weak Target Radio Quasars for ASTRO-G In-Beam Phase-Referencing, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 61, 123
- Frey, S., Gurvits, L. I., Lobanov, A. P., Schilizzi, R. T., Paragi, Zs. 2009, High-Redshift Quasars at the Highest Resolution: VSOP Results, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, *ASP Conf. Ser.* 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi,

- M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 152
- Hirabayashi, H. et al. 1998, Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme, *Science*, 281, 1825
- Hirabayashi, H. et al. 2000, The VSOP 5 GHz AGN Survey I.: Compilation and Observations, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 997
- Kamenó, S. 2009, AGN Science with VSOP and Prospects for VSOP-2, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 96
- Kardashev, N. S. 2008, Some critical experiments with RadioAstron. *Radio Universe at Ultimate Angular Resolution*, Moscow, 20-24 Oct 2008 (ftp://www.asc.rssi.ru/symp2008/Kardashev_Some%20critical%20experiments.pdf)
- Lobanov, A. P. et al. 2001, VLBI Space Observatory Programme Observation of the Quasar PKS 2215+020: A New Laboratory for Core-Jet Physics at $z=3.572$, *Astrophys. J.*, 547, 714
- Szomoru, A. 2008, EXPRéS and the e-EVN, *Proceedings of Science, PoS(IX EVN Symposium)040* (<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=72>)
- Tsuboi, M. 2009, VSOP-2/ASTRO-G Project Overview for the Astronomy Community, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 30